МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК. 62-83: 621.313.33:519.87 DOI 10.12737/18266

Моделирование режима торможения асинхронного двигателя частотного электропривода с использованием гармоник тока статора[*]

Н. Ф. Карнаухов[1], М. Н. Филимонов[2], Д. А. Статовой[3], Ф. В. Бонилья[4]**
[1,2,3,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Braking mode simulation of induction motor of variable-frequency drive using stator current harmonics[***]

N. F. Karnaukhov[1], M. N. Filimonov[2], D. A. Statovoy[3], P. Bonilla[4]
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данной работы является исследование электродинамических процессов в частотно-управляемом электроприводе (ЧУЭП) методом математического моделирования — в частности, в режиме двухтокового динамического торможения с учетом 5-й и 7-й гармоник тока статора асинхронного двигателя (АД). Приведены особенности формирования автономным инвертором напряжения (АИН) низких частот (0,2–15 Гц) тока статора АД, сопровождаемого дополнительными потерями электроэнергии в ЧУЭП и появлением пульсирующих моментов на валу АД, вызывающих неравномерность движения исполнительного механизма (ИМ) рабочего органа (РО) технологической машины (ТМ) в зоне малой скорости и усложняющих их позиционирование в заданное положение. При неоднозначности сил трения в звеньях подвижности ИМ РО и наличии пульсирующих моментов на валу АД реализовать программное торможение ЧУЭП без коррекции закона движения достаточно трудно. Для решения этой проблемы в ЧУЭП авторы предлагают, во-первых, использовать пространственно-векторную широтно-импульсную модуляцию (ПВ ШИМ) с m-кратной подмодуляцией несущей частоты (НЧ) и без подмодуляции в режиме торможения АД. Во-вторых, целесообразно применить (кратковременно в зоне малой скорости) принцип вибрационной линеаризации для снижения коэффициента трения К до пониженного значения (Кэф) в звеньях подвижности ИМ РО за счет микровибрации ротора АД, обусловленной 5-й и 7-й гармониками тока статора. Таким образом, работа по моделированию ЧУЭП (в программном пакете Matlab + Simulink) позволила уточнить влияние 5-й и 7-й гармоник тока статора АД на возможность программного осуществления двухтокового режима динамического торможения ЧУЭП при снижении общих потерь электроэнергии в зоне малой скорости движения ИМ РО. Кроме того, была подтверждена возможность применения в типовых схемах АИН — АД предлагаемых решений электроприводов мехатронных и робототехнических систем широкого назначения с повышенными требованиями к позиционированию.

The work objective is to study electrodynamic processes in the frequency-controlled drive (FCD) by the mathematical modeling method, in particular, in the two-current mode of the dynamic braking considering the 5th and 7th current harmonics of the induction motor (IM) stator. The features of forming IM stator current low frequencies (0.2-15 Hz) by the autonomous voltage inverter (AVI) followed by the additional electricity loss in the FCD, and the appearance of torque ripple on the IM shaft causing jerkiness of the actuating mechanism (AM) of the production machine (PM) executive device (ED) in the low speed zone and complicating their locating in the prearranged position, are given. It is hard to implement the FCD scheduled deceleration without trajectory correction at the friction forces ambiguity in the ED AM mobility links and availability of the torque ripple on the IM shaft. To solve this problem, the authors offer, first, to use a spatial-vector pulse-width modulation (SV PWM) with m-fold submodulation of the carrier frequency (CF) and without submodulation in the IM braking mode. Secondly, it is reasonable to apply (momentarily in a low speed area) the principle of linearization by oscillation to reduce the K friction coefficient to a decreased value in the ED AM mobility links by the IM rotor microvibration due to the 5th and 7th harmonics of the stator current. Thus, the work on modeling FCD (in Matlab + Simulink software package) allows more accurately define the impact of the 5th and 7th harmonics of the IM stator current on the capability of the software implementation of the two-current mode of the FCD dynamic braking while reducing the total energy loss in the ED AM low-speed motion area. In addition, the applicability of the proposed solutions of the electric drives of mechatronic and robotic multipurpose systems with higher requirements for positioning in the basic AM – AVI circuits is confirmed.

Ключевые слова: инвертор напряжения, пространственно-векторная широтно-импульсная модуляция (ПВ ШИМ), гармоники тока статора, пульсирующий (колебательный) момент, двухтоковое динамическое торможение, подмодуляция несущей частоты, электрические и тепловые потери, вибрационная линеаризация, позиционирование.

Keywords: voltage inverter, spatial-vector pulse-width modulation (SV PWM), stator current harmonics, torque ripple, two-current dynamic deceleration, submodulation of carrier frequency, electrical and heat losses, linearization by oscillation, positioning.

---

[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**] E-mail: nika811@bk.ru, maxfil2006@yandex.ru, dr-monro@mail.ru, tiranoruso@gmail.com
[***] The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. В производственной практике — например, в промышленных роботах (ПР), манипуляторах, металлорежущих станках — могли бы более широко применяться частотно-управляемые электроприводы (ЧУЭП) на базе короткозамкнутого асинхронного двигателя (АД), функционирующие по схемотехническому решению [1]: автономный инвертор напряжения — асинхронный двигатель (АИН — АД). Однако в настоящее время использование ЧУЭП несколько ограничено рядом причин [1, 2, 3]. В частности, невозможно обеспечить необходимые механические характеристики АД в зоне низких и ползучих скоростей с учетом сил трения в направляющих движения исполнительного механизма (ИМ) рабочего органа (РО) технологической машины (ТМ). Известна [4] неоднозначность движущих сил ИМ, обусловленная пульсациями результирующего момента на валу АД при квазисинусоидальном питающем напряжении статора низкой частоты 0,2–15 Гц. Это ведет к формированию шагового режима вращения ротора, что объясняется следующим образом. Множество магнитных полей в статоре АД возбуждаются от гармоник тока — в основном, за счет взаимодействия полей 5-й и 7-й гармоник с основной гармоникой — и вращаются с различными скоростями и в различных направлениях [2]. Если рассматривать случайный характер изменения сил трения в звеньях подвижности ТМ в совокупности с формированием пульсирующего момента на валу АД, то представляется довольно сложным обеспечение заданного режима программного торможения АД.

Данная статья посвящена проблеме снижения влияния трения в звеньях подвижности на точность позиционирования ИМ ТМ за счет кратковременного использования результирующего (пульсирующего) момента полей 5-й и 7-й гармоник тока статора с основной гармоникой в режиме предоконечного торможения АД мощностью до 100 Вт. Принято, что структура ИМ промышленных роботов станочных систем является сложной, и в ней наибольшая интенсивность микродвижений звеньев наблюдается на частотах собственных колебаний $f_{им}$, изменяющихся от 3 до 50 Гц [5]. По мнению авторов, данная задача может быть решена следующим образом. На конечной стадии режима торможения АД (например, транспортирующей степени подвижности с электроприводом в системе АИН — АД) предлагается формирование пульсирующего момента, изменяющее «эффективный» коэффициент трения звена подвижности ИМ в результате применения принципа «вибрационной линеаризации» коэффициента трения [7].

Цели исследования

— Оценка влияния 5-й и 7-й гармоник тока статора частотно-управляемого АД на формирование колебательного момента на валу АД. Поиск (методом математического моделирования) условий обеспечения линейности перемещения ИМ РО ТМ в области низких частот вращения вала АД.

— Разработка метода (способа) регулирования момента трения в звеньях ИМ привода ТМ посредством формирования и управления амплитудами 5-й и 7-й гармоник тока обмоток статора. Это позволит использовать эффект вибрационной линеаризации вращения ротора АД для снижения влияния сил трения и улучшения качества позиционирования ИМ при работе ЧУЭП в зоне малой скорости.

Решение задачи. Для решения указанной проблемы представляется целесообразным следующее.

— Использовать АИН с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией (ПВШИМ) и со ступенчато-программно-перенастраиваемым уровнем несущей [1, 3]. Изменение алгоритма работы ключей АИН (введение подмодуляции несущей частоты — НЧ) может обеспечить управляемое формирование выходного напряжения АИН повышенной электромагнитной совместимости с коэффициентом несинусоидальности, не превышающим 5 % (ГОСТ 13109-97) [2, 3].

— Ввести режим подмодуляции НЧ (16–50 кГц). В этом случае можно будет регулировать амплитуду гармонических составляющих напряжения АД и применить принцип вибрационной линеаризации коэффициента трения в звеньях подвижности ИМ. Это важно для повышения равномерности вращения вала АД, движения ИМ в режиме программного торможения и позиционирования РО [7, 5].

Известно [2], что работа ТМ в повторно-кратковременном режиме сопровождается значительными изменениями скоростей движения ИМ РО. Это связано с предельно-допустимыми моментами исполнительного двигателя и увеличением тепловых потерь. При низких значениях моментов наблюдается увеличение переходных процессов, сопровождаемое снижением быстродействия и производительности ТМ. Поэтому выбор продолжительности пуска и торможения АД ТМ в каждом конкретном случае требует детального исследования. Режим должен формироваться в зависимости от вида нагрузки: регулярная, нерегулярная, изменяющаяся с некоторой кратностью статического момента или зависящая от формы графика (двухпериодного или трехпериодного) скоростей [6].

Для исследования пускотормозных режимов АД при частотном управлении математическая модель последнего может быть основана на дифференциальных уравнениях обобщенной электрической машины и представлена в двухкоординатной системе α и β [1, 4]:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i'_{1\alpha} \\ i'_{2\alpha} \\ i'_{1\beta} \\ i'_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -cr_1 & dr'_2 & \Omega dL_{12} & \Omega dL_2 \\ dr_1 & -br'_2 & -\Omega bL_{12} & -\Omega bL_2 \\ -\Omega dL_{12} & -\Omega dL_2 & -cr_1 & dr'_2 \\ \Omega bL_{12} & \Omega bL_2 & dr_1 & -br'_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{2\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i_{2\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ -d & 0 \\ 0 & c \\ 0 & -d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{1\alpha} \\ u_{2\beta} \end{bmatrix}, \\ J \cdot \Omega' = \dfrac{3}{2} \cdot p \cdot L_{12} \cdot (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) - M_{\text{н}}(\Omega), \qquad = \int\limits_0^{t_1} \Omega dt, \end{cases} \tag{1}$$

где $u_{1\alpha} = U_H \cdot \gamma \cdot \cos(\alpha \cdot t)$; $u_{2\beta} = U_H \cdot \gamma \cdot \sin(\alpha \cdot t)$; $L_1 = L_{12} + L_{\sigma 1}$; $L_2 = L_{12} + L_{\sigma 2}$; $b = \dfrac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2}$; $c = \dfrac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2}$; $d = \dfrac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2}$.

В системе уравнений (1): $i_{1\alpha}$, $i_{2\alpha}$, $i_{1\beta}$, $i_{2\beta}$ — токи в обмотках статора и ротора по неподвижным относительно статора координатным осям α и β; $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ — напряжения на обмотках статора по осям α и β; r_1, r'_2 — активные сопротивления ротора и статора соответственно; L_1, L_2, L_{12} — индуктивности статора и ротора и взаимная индуктивность; $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ — индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; p — число пар полюсов статора АД; U_H, γ, α — номинальное относительное входное напряжение питания АД, частота входного напряжения питания; Ω — угловая частота вращения ротора АД; $M_н(\Omega)$ — момент нагрузки на роторе АД; J — момент инерции ротора АД; φ — угол поворота ротора.

В системе Mathcad была исследована приведенная в [8] математическая модель АД АИР-50. Ее параметры: Pн = 90 Вт (Ps = 93,75 ВА); $U_{фн}$ =127 В; f_c = 50 Гц; $R_{фс}$ = 37,15 Ом; L_s = 0,102 Гн; R_r = 25,69 Ом; L_r = 0,102 Гн; взаимная L_{sr} = 1,69 Гн; μ_r = 0,00025; $J_r = 0{,}2454 \cdot 10^{-4}$ кг · м^2; $2p$ = 1. В результате получены графические зависимости фазных токов (кривые 1, 2, 3 (рис. 1, а) и момента АД (кривая 1, рис. 1, б)) при переключении (t = 0,12 с) IGBT-транзисторов АИН с переходом (переключением) от двенадцати рабочих состояний базовых векторов к двадцати четырем (соответственно, кривые 4, 5, 6 рис. 1, а) и момента (кривая 2, рис. 1, б) при формировании квазисинусоидального напряжения без подмодуляции несущей частоты.

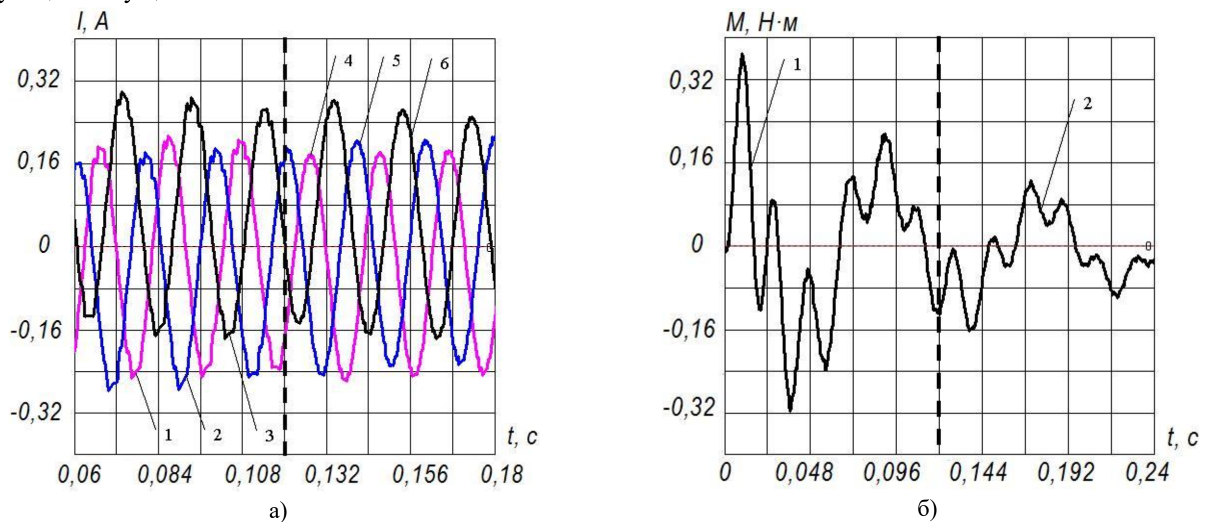


Рис. 1. Фазные токи и момент на валу АД без подмодуляции НЧ

Анализ зависимостей показывает, что кривые 1, 2, 3 фазных токов статора АД при 12 базовых векторах (рис. 1, а) имеют видимые искажения (выбросы) амплитуд, значения которых на 13,6 % превышают уровни амплитуд фазных токов (кривые 4, 5, 6), формируемых при 24 базовых векторах. При тех же условиях генерирования фазных токов в зависимостях создаваемого момента на валу АД гармоническими составляющими (кривые 1 и 2, рис. 1, б) имеет место уменьшение амплитуд выбросов до 46 %.

На рис. 2 приведены зависимости тех же переходов рабочих состояний АИН (с 12 на 24 базовых вектора) в режиме двукратной подмодуляции НЧ, т. е. m = 2.

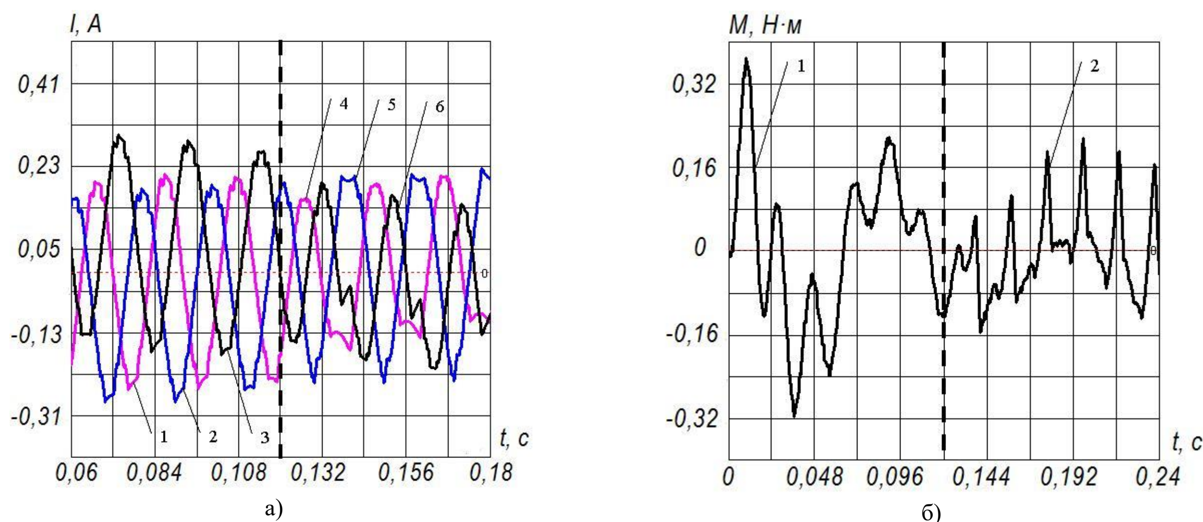


Рис. 2. Фазные токи и моменты на валу АД с двукратной подмодуляцией

Сопоставление амплитуд токов фаз А, В (кривые 1 и 4, 3 и 6, рис. 2, а) подтверждает уменьшение выбросов (от 37 % до 12 %). Это значительно изменяет характер формируемой зависимости момента на валу АД (кривые 1 и 2, рис. 2, б) при снижении всплесков амплитуд момента от 47 % до 23 %. Появление учащенных всплесков уменьшенных амплитуд на зависимости формируемого момента (за время Δt = 0,24 – 0,12 = 0,12 с) позволяет повысить равномерность вращения вала АД, плавность перемещения ИМ в зоне позиционирования. Применение 2-3-кратной и выше подмодуляции НЧ АИН в IGBT-транзисторах сопровождается дополнительными тепловыми потерями. Их можно снизить, изменив алгоритм работы IGBT-транзисторов. При этом по сигналам датчиков учитывается малое время нахождения ИМ РО ТМ в зоне позиционирования.

В программном пакете Matlab + Simulink была разработана обобщенная модель ЧУЭП [9] для:

— учета пульсирующих моментов;

— оценки влияния сил трения на формирование скорости АД;

— выявления особенностей управления движением ИМ в зоне позиционирования (рис. 3).

Рис. 3. Схема моделирования режима торможения АД в системе АИН — АД

Модель содержит следующие блоки.

Asynchronous machine — асинхронный двигатель (АД) переменного тока с короткозамкнутым ротором, описываемый системой уравнений (1).

Bridge — трехфазный мостовой выпрямитель на диодах с тормозным резистором R и ключом Breaker для управления режимом динамического торможения АД.

Three-Phase Voltage Source — генератор трехфазного напряжения для питания АД.

Three-Phase Breaker — трехфазный выключатель для отключения/подключения питающего трехфазного напряжения к АД, формируемого блоком Three-Phase Voltage Source.

DC Voltage Source — источник постоянного напряжения для формирования постоянного тока в обмотке статора АД в режиме двухтокового динамического торможения.

Breaker1 и Breaker2 — ключи для управления режимом двухтокового динамического торможения АД.

Step1 — блок, формирующий сигнал управления ключом Breaker блока Bridge.

Three-Phase Voltage Source1 — генератор трехфазного напряжения для формирования дополнительного напряжения питания АД 5-й или 7-й гармоникой.

Three-Phase Breaker1 — трехфазный выключатель для отключения/подключения к АД трехфазного напряжения 5-й или 7-й гармоники, формируемых блоком Three-Phase Voltage Source1.

Vab, Vbc и Vac — блоки для измерения фазных напряжений на обмотках статора АД.

Measurements — блок для измерения и формирования следующих переменных, описывающих состояние АД:

— Rotor speed — угловая скорость вращения ротора, рад/с;

— Stator current is_a — ток фазы A статора, Ампер;

— Stator current is_b — ток фазы B статора, Ампер;

— Stator current is_c — ток фазы C статора, Ампер;

— Electromagnetic torque Te — электромагнитный момент ротора, Н·м;

— Rotor current iq — проекция тока ротора на ось α, Ампер;

— Rotor current id — проекция тока ротора на ось β, Ампер;

— Stator current is_q — проекция тока статора на ось α, Ампер;

— Stator current is_d — проекция тока статора на ось β, Ампер.

Losses-блок предназначен для измерения суммарных электрических (тепловых) потерь мощности и энергии в обмотках статора и ротора АД, расчет которых осуществляется в соответствии с выражениями [1, 10, 11]:

$$P_Э = \left(i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2\right)\cdot r_1 + \left(i_{2\alpha}^2 + i_{2\beta}^2\right)\cdot r_2'; \quad Q_Э = \int_0^{t_1} P_Э dt. \qquad (2)$$

Здесь $P_Э$ — суммарные электрические (тепловые) потери мощности; $Q_Э$ — суммарные потери энергии в обмотках статора и ротора АД.

Integrator1 — блок для формирования сигнала Rotor Angle (угол поворота ротора АД, рад) путем интегрирования угловой скорости вращения ротора.

Load + vibration-блок — S-функция для формирования момента нагрузки на роторе АД в функции угловой скорости вращения ротора.

При этом момент сопротивления на роторе АД задается в виде уравнения, например, «вентиляторной» нагрузки с дополнением пульсирующей составляющей момента в режиме торможения согласно системе уравнений:

$$M(\Omega) = \begin{cases} M_c + k\cdot\Omega^2, \ \ при \ \ 0 \le t \le t_1; \\ M_c + k\cdot\Omega^2 + M_{c1}\cdot\sin(\Omega_1 t), \ \ при \ \ t > t_1. \end{cases} \qquad (3)$$

Здесь M_c — статическая часть момента нагрузки на роторе АД, k — коэффициент трения; M_{c1} — амплитуда пульсирующего момента сопротивления, обусловленного микровибрацией ротора АД, вызванной наличием высших гармоник в напряжении питания АД в режиме торможения; Ω_1 — частота высшей гармоники напряжения питания АД, создающей пульсирующий момент сопротивления.

Simulink-PS Converter — блок, преобразующий безразмерную математическую величину в размерную физическую величину (математического значения момента сопротивления на роторе АД в физическое значение в Н · м).
Ideal Torque Source — блок, формирующий на выходе крутящий момент, пропорциональный значению физического сигнала на его входе.

Solver Configuration — блок, задающий условия для решения уравнений, описывающих модель в Matlab + Simulink.

Clock1 и Clock2 — блоки, формирующие текущее время процесса моделирования.

To Workspace, To Workspace 1, To Workspace 2, To Workspace 3 — блоки, передающие в систему Matlab Workspace рассчитанные в результате моделирования значения угла поворота ротора АД и компонентов тока статора i_{1b}, i_{1c}, i_{1a} соответственно.

Load — блок, задающий начальное значение момента сопротивления ротора АД.

Load1 — блок, задающий режим торможения АД под нагрузкой.

Manual Swith — блок для переключения режимов торможения АД под нагрузкой и на холостом ходу.

Scope 1, Scope 2, Scope 3, Scope 4, Scope 5 — блоки, которые графически отображают осциллограммы сигналов: момента нагрузки ротора АД; фазных напряжений на обмотках статора; угловой скорости вращения ротора; тока фазы a ротора; электромагнитного момента на роторе АД; угла поворота ротора; суммарных электрических (тепловых) потерь энергии и мощности в обмотках статора и ротора АД.

Chart — блок, управляющий работой других блоков модели с учетом сигналов угловой частоты вращения ротора Ω и текущего времени моделирования t, формирует следующие управляющие сигналы:

$$loadControl = \begin{cases} 0, \ 0 \le t \le 0{,}5; \\ 1, \ 0{,}5 < t \le 1; \\ 2, \ t > 1 \ и \ 0{,}01 \cdot \Omega_H \le \Omega \le 0{,}1 \cdot \Omega_H; \\ 3, \ t > 1 \ и \ \Omega < 0{,}01 \cdot \Omega_H; \end{cases}$$

$$threePScontrol = \begin{cases} 0, \ t > 1; \\ 1, \ 0 \le t \le 1; \end{cases} \qquad (4)$$

$$dcPScontrol = \begin{cases} 0, \ 0 \le t \le 1 \ или \ t > 1 \ и \ \Omega < 0{,}01 \cdot \Omega_H; \\ 1, \ t > 1 \ и \ \Omega \ge 0{,}01 \cdot \Omega_H; \end{cases}$$

$$dcSP1 = \begin{cases} 1, \ 0 \le t \le 1 \ или \ t > 1 \ и \ \Omega < 0{,}01 \cdot \Omega_H; \\ 0, \ t > 1 \ и \ \Omega \ge 0{,}01 \cdot \Omega_H; \end{cases}$$

$$dcPS1 = \begin{cases} 0, \ 0 \le t \le 1 \ или \ t > 1 \ и \ \Omega < 0{,}01 \cdot \Omega_H \ или \ t > 1 \ и \ \Omega > 0{,}1 \cdot \Omega_H; \\ 1, \ t > 1 \ и \ 0{,}01 \cdot \Omega_H \le \Omega \le 0{,}1 \cdot \Omega_H. \end{cases}$$

Диапазоны изменения характерных параметров уравнения (4) выбраны в соответствии с тахограммой $\Omega = f(S)$, приведенной на рис. 4.

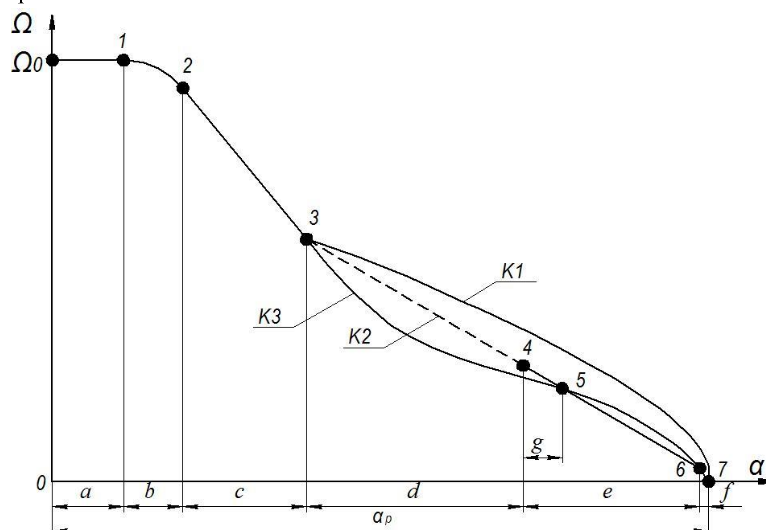


Рис. 4. Тахограмма угловой скорости АД на расчетном участке торможения

В процессе регулирования скорости и положения ИМ используются сигналы обратных связей по регулируемым переменным, обеспечиваемые соответствующими измерительными устройствами с целью управления скоростью ИМ РО в функции пройденного пути.

Для повышения производительности ТМ можно программно исключить промежуточные формирования скорости движения (перемещения) ИМ РО (точки 1, 2, 3 тахограммы, рис. 4). Это связано с возможностями СУ по обеспечению непрерывного изменения скорости АД в режиме, например, программного двухтокового динамического торможения при прохождении ИМ пути (a + b + c). Такой режим торможения АД в совокупности с работой АИН на

базе ПВШИМ позволяет реализовать допустимые ускорения (разгона — торможения) без ударов в кинематике ИМ ЧУЭП ТМ до точек 4, 5, когда такое торможение еще осуществимо [10].

С учетом длины участка (d + e + f), соответствующего точкам 3, 4, 5, 6, 7, (линейная зависимость К 2), скорость торможения можно определить согласно выражению [1, 6, 12]:

$$\Omega_{ДОП} = \sqrt{2M_T \cdot \Delta\alpha / J_П \cdot K_S}\ , \qquad (5)$$

где $\Omega_{ДОП}$ — допустимая скорость торможения по условиям прочности конструкции исполнительного механизма, $M_T = M_{Tmax}$ — максимальное значение динамического момента торможения; $J_П$ — момент инерции ИМ ЧУЭП, приведенный к валу АД.

Приращение пути при постоянном тормозном моменте из (5) составит [1, 12]:

$$\Delta\alpha = J_П \cdot \frac{\Omega_0^2 \cdot K_S}{2M_T} = b \cdot \Omega_0^2 . \qquad (6)$$

Здесь Ω_0 — начальная скорость торможения, K_S — коэффициент пропорциональности между углом поворота вала двигателя $\varphi_в$ и перемещением (рад/рад, м/рад).

Если принять $J_П$ = const в (5) и (6), то ожидаемое значение $\Delta\alpha$ связано с формированием тормозного момента M_T как параметра, зависимого от изменяющегося значения момента трения в подвижных звеньях ИМ в зоне малой и ползучей скорости движения ИМ.

Известно [6], что тахограмма участка 3–7 движения ИМ существующих станочных систем в указанной зоне скорости может быть реализована по-разному — кривыми К1, К2, К3, зависимыми от инерционной составляющей $J_П$ (кривая К1), от момента трения и скорости в виде экспериментальной кривой К3 или линейной зависимости К2 (для идеального случая).

Неоднозначность момента торможения $M_т$ в зоне 3–4–5–6–7 затрудняет точное определение значения $\Delta\alpha$ по соотношению (6) из-за нестабильности момента трения $M_{тр}$ и сопровождается снижением точности позиционирования ИМ РО.

Для измерения длины участка g (точки 4–5) в СУ ЧУЭП дается оценка фактической скорости движения и положения РО посредством датчиков (инкрементальный энкодер DRS60 фирмы SICK; интерфейс — TTL/RS422; количество импульсов на один оборот — 8192). Это позволяет осуществить в модели программное регулирование амплитуды 7-й гармоники (участок 5–6), а на участке 6–7 — амплитуды 5-й гармоники с целью создания микровибраций ротора АД и получения эффекта вибрационной линеаризации [4] коэффициента трения на малое время в нелинейной механической системе.

Введение дополнительной микровибрации в звене подвижности ИМ от АД позволяет уменьшить значение эффективного коэффициента трения ($k_{эф}$<k) в транспортирующем звене подвижности, что подтверждают теоретические [7] и экспериментальные исследования [13].

При моделировании режимов работы ЧУЭП использовались следующие значения параметров для блоков модели.

1. Asynchronous machine (параметры АИР-50 А2).

2. Код S-функции, реализуемой блоком Load + vibration:

```
function load = setLoad(t,comandLoad,omega,torque)
%#codegen
wn = 315; % Nominalnaya ckorost
tau_set = 20*torque/100; tau_friction = 3*torque/100;
load =0;
if (comandLoad == 1)
 load = torque + tau_friction*omega*omega;
end if(comandLoad == 2)
 load = torque + tau_friction*omega*omega +
 5*tau_set*sin(2*pi*250*t);
 %load = tau_friction*omega*omega;
End if(comandLoad == 3)load = 0; end
```

3. Three-Phase Voltage Source: амплитудное значение напряжения — 179,61 В; фаза напряжения — 0 эл. град; частота напряжения — 50 Гц.

4. Three-Phase Voltage Source: амплитудное значение напряжения — 0,2·24 В для 5-й или 0,13·24 В для 7-й гармоники питающего напряжения; фаза напряжения — 0 эл. град; частота напряжения — 250 Гц (5-я гармоника) или 350 Гц (7-я гармоника).

5. Блок Bridge: R (сопротивление) — 10 Ом.
6. Блок Losses: Rr (активное сопротивление обмотки фазы ротора) — 25,69 Ом.
7. Блок Losses: Rs (активное сопротивление обмотки фазы статора) — 37,15 Ом.
8. Блок Losses: (Math Function 1, 2, 3, 4) function — square (u^2).
9. Блок Load: constant value (–0,0001 Н·м).
10. Блок Step1: step time — 1; initial value — 0; final value — 1; sample time — 0.
11) Блок Load1: constant value (–0,0001 Н·м).

В остальных блоках схемы, изображенной на рис. 3, используются значения параметров по умолчанию. Время моделирования составляет 1,4 с.

На рис. 5 приведены зависимости, полученные при моделировании электромеханических процессов в АД ЧУЭП для режима разгона (временной участок 1, t_1 = 0,05 с) и поддержания скорости (временной участок 2, t_2 = 0,35 с) с моментом нагружения, равным моменту трения звеньев ИМ, принятым равным $M_c = M_m$ = 0,07 Н·м.

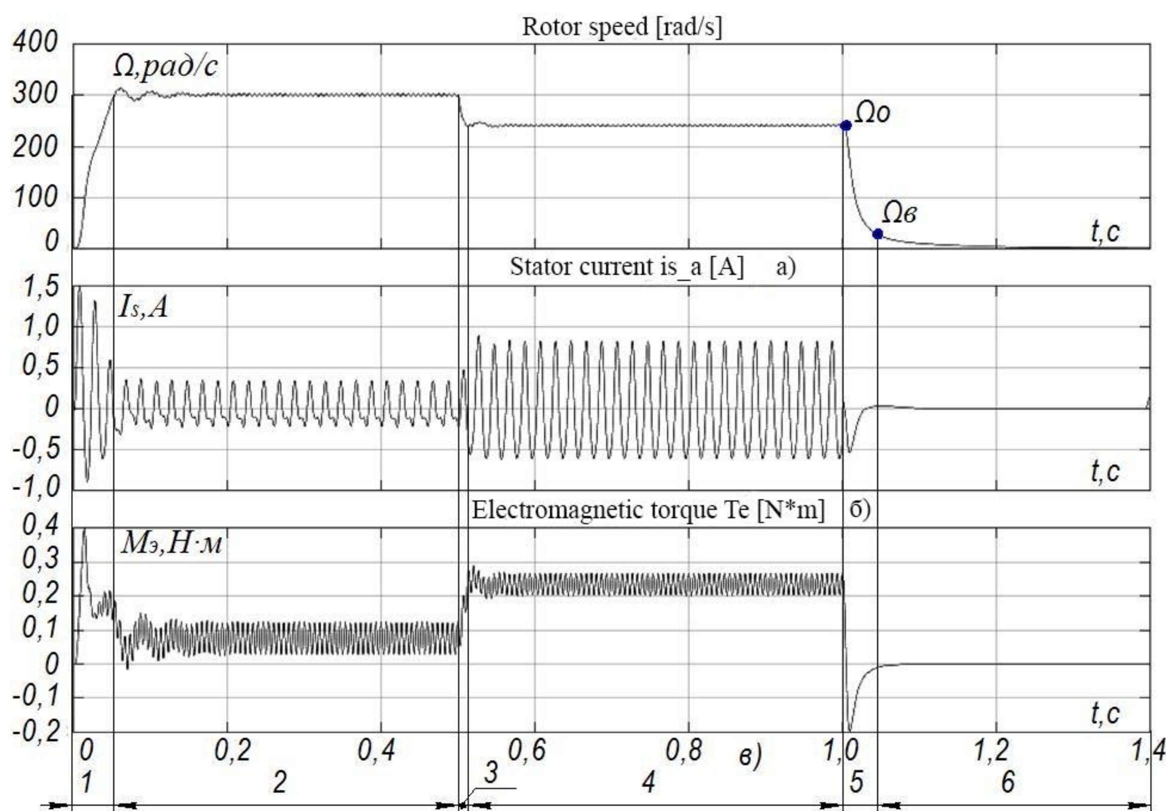


Рис. 5. Угловая частота ротора (а), ток статора (б) и электромагнитный момент АД (в) в функции от времени (с подмодуляцией m = 4)

Пуск АД сопровождается «бросками» формируемых значений:
— максимального тока фазы статора I_{cm} =1,5 А;
— максимального момента двигателя M_m.

При этом частота вращения ротора увеличивается от 0 до Ω_0 = 300 рад/с с перерегулированием σ не более 8 %.

На временном участке 3 (t_3 = 0,02 с) осуществляется наброс статического момента ΔM_c = 0,155 Н·м в соответствии с выражением (3), что вызывает рост тока I_c и просадку частоты вращения вала АД с 300 рад/с до 245 рад/с. Состояние такого режима АД сохраняется на временном интервале 4 (t_4 = 0,48 с).

На участке 5 (t_5 = 0,06 с) с переходом на участок 6 приведены изменения контролируемых параметров АД, когда при t = 1 с моделируется процесс выключения АИН по формированию 3-фазного напряжения питания АД и кривой выбега (при одновременном отключении момента трения) ИМ ТМ.

Математическое моделирование с использованием разработанной модели (рис. 3) позволило уточнить влияние пульсаций электромагнитного момента АД, создаваемого 5-й и 7-й гармониками питающего напряжения, на коэффициент трения в звеньях подвижности ИМ при торможении ЧУЭП для различных значений момента инерции нагрузки, приведенных к ротору АД. Для этого на участке 6 при скорости Wв = $0{,}1 \cdot \Omega_0$ движения ИМ (рис. 5) дополнительным генератором Three-Phase Voltage Source1 формировалось трехфазное напряжение амплитуды и частоты гармоник питания (U_n) АД:

— 5-й — 20 % от U_n, 250 Гц;
— 7-й — 13 % от U_n, 350 Гц.

Измерения угла поворота φ ротора осуществлялись от начального момента времени до полной остановки АД. Далее этот угол сравнивался с углом поворота φ_0, измеряемым при отсутствии в напряжении питания АД 5-й или 7-й гармоник на участке торможения:

$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$. (7)

Измерения разности углов поворота Δφ проводились при $J_П$ нагрузки ЧУЭП, изменяемых от номинального значения $J_н$ до десятикратного — $10 \cdot J_н$, а также для случая торможения АД в режиме холостого хода и под нагрузкой. Полученные зависимости Δφ в функции от $J_н$ (для случая питания АД напряжением 5-й или 7-й гармоники в режиме торможения под нагрузкой и на холостом ходу) представлены на рис. 6.

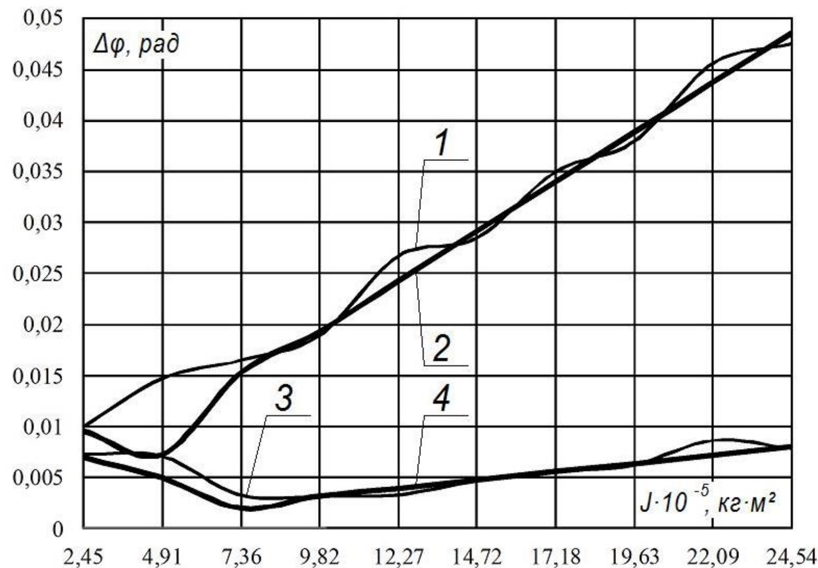


Рис. 6. Зависимости разностей угла поворота ротора АД при изменении гармонических составляющих тока статора

Зависимости пронумерованы соответственно моделируемым режимам работы ЧУЭП:

1 — при торможении без нагрузки (в режиме холостого хода) и пульсирующем электромагнитном моменте, создаваемом 5-й гармоникой;

2 — при торможении с номинальной нагрузкой и пульсирующем электромагнитном моменте, создаваемом 5-й гармоникой;

3 — при торможении без нагрузки (в режиме холостого хода) и пульсирующем электромагнитном моменте, создаваемом 7-й гармоникой;

4 — при торможении с номинальной нагрузкой и пульсирующем электромагнитном моменте, создаваемом 7-й гармоникой.

Анализ зависимостей 1, 2 (рис. 6) показывает, что наличие 5-й гармоники (амплитуда 20 %, ток статора I_c, частота 250 Гц) формирует дополнительный момент на валу АД, обеспечивающий эффект вибрационной линеаризации коэффициента трения в звеньях подвижности ИМ. Это подтверждается увеличением Δφ от 0,01 до 0,047 рад при изменении инерционной составляющей. Зависимости 3, 4 получены при моделировании режимов торможения АД в аналогичных условиях по задаваемым параметрам, но при наличии в токе I_c статора 7-й гармоники (амплитуда 13 %, частота 350 Гц). В этом случае введение дополнительной микровибрации момента на валу не является достаточным по уровню, чтобы обеспечить эффект вибрационной линеаризации коэффициента трения в звеньях подвижности ИМ. Наибольшее изменение параметра Δφ наблюдается в диапазоне от 0,00025 рад до 0,0055 рад в режиме торможения на холостом ходу и уменьшается при номинальной нагрузке (кривая 4).

На рис. 7 приведены зависимости суммарных электрических (тепловых) потерь мощности и энергии в обмотках статора и ротора АД, полученные в соответствии с уравнением (2) при включении измерительного блока Losses и режима подмодуляции выходного напряжения АИН.

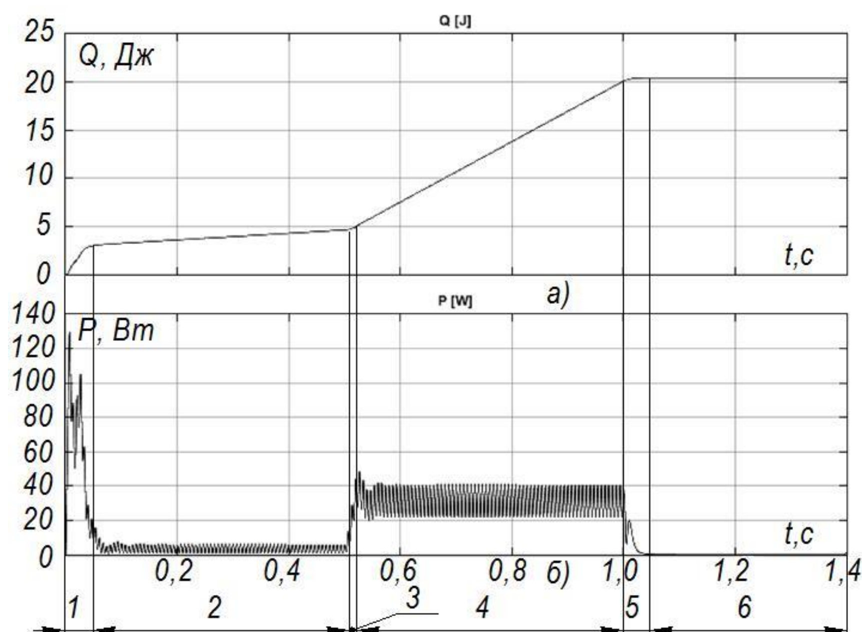


Рис. 7. Суммарные тепловые электрические потери энергии в обмотках статора и ротора АД (а) и суммарные тепловые электрические потери мощности (б) в функции времени (с подмодуляцией m = 4)

Выводы. Анализ полученных в результате моделирования режимов АД ЧУЭП при работе в зоне малой и ползучей скорости перемещения ИМ ТМ позволяет сделать следующие выводы.

1. Случайное влияние сил трения в звеньях подвижности ТМ в зоне малой скорости перемещения ИМ можно уменьшить за счет регулирования амплитуды 5-й гармоники тока статора на стадии предоконечного торможения АД, создавая режим желаемой микровибрации вала АД.

2. Эффект вибрационной линеаризации коэффициента трения в звеньях подвижности ИМ обеспечивается программным управлением АИН с ПВШИМ и ступенчатым изменением несущей частоты в режиме подмодуляции выходного напряжения АИН.

3. Посредством коррекции угла поворота вала АД можно установить программируемый выбег ИМ при торможении АД ЧУЭП и повысить точность позиционирования рабочего органа ТМ.

4. Разработанная модель ЧУЭП в программном пакете Matlab + Simulink позволяет выполнить исследования по оценке суммарных электрических потерь в АД для предполагаемых режимов работы ЧУЭП с учетом и без учета 5-й и 7-й гармоник тока статора.

Библиографический список

1. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. — Москва : Академия, 2006. — 273 с.

2. Перельмутер, В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В. М. Перельмутер. — Харьков : Основа, 2004. — 210 с.

3. Карнаухов, Н. Ф. Особенности формирования циклических режимов частотного электропривода технологических машин в зоне малой скорости движения исполнительного механизма / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, А. И. Изюмов. — Вестник. Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 6 (67). — С. 76–86.

4. Филимонов, М. Н. Улучшение динамики торможения асинхронного двигателя станочной системы с частотным управлением / М. Н. Филимонов, Н. Ф. Карнаухов // Современные проблемы машиностроения и высоких технологий : мат-лы. междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию Дон. гос. техн. ун-та. — Ростов-на-Дону, 2005. — Т. 1. — С. 236–242.

5. Добрынин, С. А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин / С. А. Добрынин, М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. — Москва : Машиностроение, 1987. — 224 с.

6. Электромеханические системы управления тяжелыми металлорежущими станками / С.В. Демидов [и др.] ; под общ. ред. С. В. Демидова. — Ленинград : Машиностроение, 1986. — 236 с.

7. Пановко, Я. Г. Лекции по основам теории вибрационных машин и технологий / Я. Г. Пановко. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 192 с.

8. Карнаухов, Н. Ф. Улучшение характеристик частотного электропривода технологических машин в зоне малой скорости движения исполнительного механизма / Н. Ф. Карнаухов, Ю. В. Пудова, М. Н. Филимонов // Молодежь. Техника. Космос : тр. IV Общерос. молодеж. науч.-техн. конф. // Вестник БГТУ. 2012. — № 15. — 380 с. — (Библиотека «Военмех»).

9. Браславский, И. Я. Использование приложения Simulink для оценки потребления электроэнергии асинхронным электроприводом / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, Ю. В. Плотников // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB : тр. II науч. конф. — Москва, 2004. — Ч. 5 — С. 1387–1394.

10. Карнаухов, Н. Ф. Особенности формирования двухтокового динамического торможения асинхронного двигателя мехатронной системы при частотном управлении / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, Н. В. Деркачев // Мехатроника-2008 : мат-лы IV междунар. науч.-практ. студ. коллоквиума. — Новочеркасск, 2008. — С. 17–20.

11. Карнаухов, Н. Ф. Энергетические показатели электропривода при частотном способе управления асинхронным двигателем / Н. Ф. Карнаухов, В. А. Прус, М. Н. Филимонов // Тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. по динамике технологических систем. — Ростов-на-Дону, 2007. — Т. III. — С. 24–30.

12. Система позиционного электропривода с задатчиком положения / П. Х. Коцегуб // Известия вузов. Электромеханика. — 1982. — № 3. — С. 331–337.

13. Установка для демонстрации рекламно-информационного материала и устройство управления перемещением носителя информации : патент 36914 Рос. Федерация : G09F13/00 H02P7/36 H02P7/62 H02P7/74 H02H7/08 / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, С. А. Ушаков. — Опубл. 27.03.04. — Бюл. № 9. — 14 с.

References

1. Sokolovskiy, G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem. [AC drives with frequency regulation.] Moscow: Akademiya, 2006, 273 p. (in Russian).

2. Perelmuter, V.M. Pryamoe upravlenie momentom i tokom dvigateley peremennogo toka. [Direct control of torque and AC motors current.] Kharkov: Osnova, 2004, 210 p. (in Russian).

3. Karnaukhov, N.F., Filimonov, M.N., Izyumov, A.I. Osobennosti formirovaniya tsiklicheskikh rezhimov chastotnogo elektroprivoda tekhnologicheskikh mashin v zone maloy skorosti dvizheniya ispolnitel'nogo mekhanizma. [Generation features of cycle operations for production machine variable-frequency drive in low-velocity zone of actuator.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 6 (67), pp. 76–86 (in Russian).

4. Filimonov, M.N., Karnaukhov, N.F. Uluchshenie dinamiki tormozheniya asinkhronnogo dvigatelya stanochnoy sistemy s chastotnym upravleniem. [Improvement of braking dynamics of the machine tool induction motor with frequency control.] Sovremennye problemy mashinostroeniya i vysokikh tekhnologiy : mat-ly. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 75-letiyu Don. gos. tekhn. un-ta. [Current problems in Machine Engineering and high technologies: Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. devoted to the 75th anniversary of DSTU.] Rostov-on-Don, 2005, vol. 1, pp. 236–242 (in Russian).

5. Dobrynin, S.A., Feldman, M.S., Firsov, G.I. Metody avtomatizirovannogo issledovaniya vibratsii mashin. [Methods of computer-aided study of machine vibration.] Moscow: Mashinostroenie, 1987, 224 p. (in Russian).

6. Demidov, S.V., et al., Demidov, S.V., ed. Elektromekhanicheskie sistemy upravleniya tyazhelymi metallorezhushchimi stankami. [Electromechanical heavy machine tools control systems.] Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 236 p. (in Russian).

7. Panovko, Y.G. Lektsii po osnovam teorii vibratsionnykh mashin i tekhnologiy. [Lectures on the theory foundations of vibrating machines and technologies.] Moscow: Bauman MSTU Publ. House, 2008, 192 p. (in Russian).

8. Karnaukhov, N.F., Pudova, Y.V., Filimonov, M.N. Uluchshenie kharakteristik chastotnogo elektroprivoda tekhnologicheskikh mashin v zone maloy skorosti dvizheniya ispolnitel'nogo mekhanizma. [Improving performance of variable-frequency electric drive of production machines in the actuator low speed motion area.] Molodezh'. Tekhnika. Kosmos: tr. IV Obshcheros. molodezh. nauch.-tekhn. konf.[Youth. Engineering. Space: Proc. IV All-Russian Youth Sci.-Tech. Conf. Bulletin of BSTU, 2012, no. 15, 380 p. (in Russian).

9. Braslavskiy, I.Y., Ishmatov, Z.S., Plotnikov, Y.V. Ispol'zovanie prilozheniya Simulink dlya otsenki potrebleniya elektroenergii asinkhronnym elektroprivodom. [Using Simulink application for estimating power consumption by asynchronous drive.] Proektirovanie inzhenernykh i nauchnykh prilozheniy v srede MATLAB: tr. II nauch. konf. [Designing engineering and scientific applications in MATLAB: Proc. II Sci.Conf.] Moscow, 2004, part 5, pp. 1387–1394 (in Russian).

10. Karnaukhov, N.F, Filimonov, M.N., Derkachev, N.V. Osobennosti formirovaniya dvukhtokovogo dinamicheskogo tormozheniya asinkhronnogo dvigatelya mekhatronnoy sistemy pri chastotnom upravlenii. [Features of forming two-current dynamic braking of mechatronic system asynchronous motor with frequency control.] Mekhatronika-2008: mat-ly IV

mezhdunar. nauch.-prakt. stud. kollokviuma. [Mechatronics-2008: Proc. IV Int. Sci.-Pract. Student Colloquium.] Novocherkassk, 2008, pp. 17–20 (in Russian).

11. Karnaukhov, N.F, Prus, V.A., Filimonov, M.N. Energeticheskie pokazateli elektroprivoda pri chastotnom sposobe upravleniya asinkhronnym dvigatelem. [Energy performance of electric drive with frequency control method of induction motor.] Tr. VIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. po dinamike tekhnologicheskikh sistem. [Proc. VIII Int. Sci.Eng. Conf. on dynamics of the technological systems.] Rostov-on-Don, 2007, vol. III, pp. 24–30 (in Russian).

12. Kotsegub, P.K. Sistema pozitsionnogo elektroprivoda s zadatchikom polozheniya. [Position electrodrive system with indexing mechanism.] Russian Electromechanics, 1982, no. 3, pp. 331–337 (in Russian).

13. Karnaukhov, N.F., Filimonov, M.N., Ushakov, S.A. Ustanovka dlya demonstratsii reklamno-informatsionnogo materiala i ustroystvo upravleniya peremeshcheniem nositelya informatsii: patent 36914 Ros. Federatsiya: G09F13/00 H02P7/36 H02P7/62 H02P7/74 H02H7/08 / [Demonstrator of marketing material and motion control device for data carrier.] Patent RF no. 36914, 2004 (in Russian).

Поступила в редакцию 14.12.2015
Сдана в редакцию 28.12.2015
Запланирована в номер 22.01.2016